

流量関数法による心臓腔内渦流動態の3次元解析 に関する研究

著者	菅原 重生
号	1497
発行年	1998
URL	http://hdl.handle.net/10097/21728

氏 名（本籍）
菅 原 重 生

学 位 の 種 類
博 士（医 学）

学 位 記 番 号
医 博 第 1 4 9 7 号

学位授与年月日
平 成 10 年 9 月 9 日

学位授与の条件
学位規則第 4 条第 1 項該当

研 究 科 専 攻
東北大学大学院医学系研究科
（博士課程）内科学系専攻

学 位 論 文 題 目
流量関数法による心臓腔内渦流動態の 3 次元解析に関する研究

（主 査）
論文審査委員
教授 仁 田 新 一 教授 田 林 暁 一

教授 白 土 邦 男

論文内容要旨

【背景および目的】

種々の心疾患では心構造の解剖学的および機能的異常に応じて弁尖、心筋など心構造物の動態が変化し、心臓腔内に異常血流が発生する。特に拡張型心筋症や心筋梗塞などの心筋疾患においては、左室壁運動異常によって生じる異常血流の詳細な解析は、壁運動異常による心機能への影響や左室内血栓形成の機序等を解明するためには重要な情報を提供すると考えられる。心臓腔内血流動態の解析を目的に、超音波ドプラ法によって得られた2次元断面上の速度情報をもとに、非侵襲的に流れを面上に流線で表示する2次元流線分布図法を開発し臨床応用することを行ってきた。しかし、これまでの方法では流れを2次元流と見なして処理していたため、面に垂直に流入あるいは流出する流れの成分が表示できず、3次元流の解析には問題を残していた。

本研究では、このような問題を解決し、3次元流の特徴を失わずに3次元流を面上の流線分布として表示する新しい方法を考案し、モデル流れを解析してこの方法の妥当性を示した。その上で、この方法を用いて健常例、拡張型心筋症例および心筋梗塞例における左室内血流動態、特に左室内に生じる代表的な3次元流である渦流の動態を解析し、その病態生理学的意義の究明を行った。

【研究成果および考察】

(1) 流れの中に設定した断面上で流れを解明する方法として、3次元流の特徴を失うことなく流れを面上に流線を用いて表示する「流量関数法」を考案した。この方法は、超音波ドプラ法にて得られたビーム方向の流速の2次元分布をもとに、3次元流を、面に平行に流出流入する成分と面に垂直に流出流入する成分とに分離し、面に平行に流出入する成分を面内流量関数として、また面に垂直に流出入する成分は点源から出入りする流れと考え点源流量関数として算出し、その和を流量関数として求める方法である。この流量関数は点源の位置と流量の情報を含み、さらにその等流量線が流線となる性質をもっており、等流量線を描くことより流線分布が得られる。流線は、流れの方向、性質、流量などの定性的および定量的な情報を表示することができ、流れの解析に重要な情報を提供する。

(2) 3次元流であるモデル流れを実験的に作成し、本法を適用して断面上の流線分布を表示した。モデル流れの実験データをもとに計算上から求めた速度分布は、本法で求めた速度分布のよく一致した。また、本法による流線表示と光切断法による流れの可視化表示を比較したところ、各断面において両者は良好な一致を示し、本法の妥当性を示すものと判断された。

(3) 本法を左心室内の渦流動態解析に適用し、健常心および病的心で発生する渦流を対象に、その特徴をモデル渦流を含めて検討した。その結果、1) モデル渦流では断面方向を変えて流線分布を描かせ解析することによって、渦軸の方向等を3次的に把握でき、渦流の特徴を示すことが可能であることが判明した。2) 健常心では駆出期流出路血流は2次元流とみなせるような単純な流れであったが、その初期には僧帽弁直下に速度の速い渦流が発生し、これは弁閉鎖に大きく貢献することが示された。拡張期においては、急速流入期には房室弁背面に弁尖を取り巻く形の渦軸をもつ流れの剥離によるドーナツ形の渦流が生じ、拡張末期には心尖部付近に半円形の渦軸をもつ旋回流が生じることが示された。3) 心筋梗塞や拡張型心筋症などの病的心では複雑な3次的流れに変化しており、心筋障害により左室内血流性状が変化することが示された。4) 拡張型心筋症例における左室内渦流は心室の中央部に前後左右に向かう渦軸が形成され糸巻き状の渦が形成される。拡張早期に回転が早くなり、拡大した心室に流入血流を効率良く流入させるのに役立ち、心房収縮時に再び早くなる回転は遠心力により駆出を補助するように働くと考えられ、拡大心における渦流は流入流出の効率を高める上で大きく貢献するものと考えられた。5) 心筋梗塞による心室瘤内では緩徐流入期と等容収縮期に大きく旋回する渦流が発生し、瘤内の血流の洗いだしに役立っていると判断された。

【結 語】

3次元流である心臓腔内血流を、設定した断面上に流線を用いて表示することにより、流れの方向、性質、流量などの定性的および定量的な情報を表示することができ、詳細な血流動態の解析が可能となった。このような方法論の研究開発は独創性も高く、それにより得られた結果は多くの新知見を提示しており臨床医学的意義も極めて大きいと考えられる。

審 査 結 果 の 要 旨

心筋症や心筋梗塞などの心筋機能異常を生じる疾患では、種々の心時相において左室内血流性状が変化し、左室機能障害や左室内血栓形成に関与する可能性が示されている。左室内血流性状を表示する方法として、現在、超音波によるカラードプラ法やコントラストエコー法、X線による血管造影法が臨床的に行われ、またMRIによる方法も実用化されつつあるが、定量性をもたせて詳細に解析、表示できる方法は実用化されていない。このような方法として流れを流線で表示する2次元流線分布図法が開発され臨床応用がなされてきたが、心臓腔内血流は複雑な3次元流であり、この方法では流れを2次元流と見做して解析していたため、3次元流の表示には問題を残していた。本論文では、3次元流を流れの中に設定した2次元面上で観測したとき、流れは究極的には面に平行に流れる成分と面に垂直に流れる成分とで構成されていると考えることができるとし、この2つの成分を分離して算出し、面に垂直に流れる成分を点源として集中常數化して表示する流量関數法を考案し、この問題の解決を図っている。すなわち、この方法は3次元流をその特徴を失わずに面上に表示することを可能とし、流れの表示法として全く新しい画期的な方法であると評価できる。

本法で得られる流れの表示の妥当性を評価するためにモデル流れとして渦流を作成し、流れの可視化法として一般に行われている光切断法を対照として比較している。その結果、2次元流および3次元流のいずれもが、本法により適切に表示されることが実証され、流れの定性的評価に本法が有用であることが示されている。さらに、モデル流れの波面形状の解析から求めた速度分布が、ドプラ法で得られた速度分布と極めてよく一致していることが示され、定性性のみならず定量性という点でも本法は優れた方法であると評価できる。

本論文では、この新しい方法を用いて、健常心と疾患心における左室内血流性状を解析し、その特徴を明らかにしている。特に、左室内に発生する渦流については、その存在はこれまでも指摘されていたものの、3次元的な渦軸の方向や流れの構造および流量についての知見は本法によりはじめて明らかにされた。心尖部が心室瘤である場合、急速流入血流の大部分は心室瘤に流入せずに左室中央部で大きな渦流を形成することが示されているが、この渦流は流入血流が心室瘤内の血流に衝突して反転することで発生していること、さらに、流入血流の一部は心室瘤内に流入し内部で渦流を形成することが示され、この渦流は心室瘤内の血流の停滞を防ぎ、血栓形成を防止する作用を有するものと推察されるに至った。また、左室内に発生する渦流は、左室の収縮および拡張においてエネルギー効率を変化させるように作用すると考えられるなど、本法による渦流の定性的および定量的解析は、左室のポンプ機能の評価に重要な情報を提供するものと期待される。このような新手法の開発とそれによる心臓腔内血流性状の新たな知見の解明をテーマとした本論文は、独創性も高く、また、今後の発展性も期待され、博士論文に値すると判断される。